

БОЛДЫРЕВ Г.Г.

Профессор кафедры «Основания и фундаменты» Инженерно-строительного института Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, технический директор ООО «НПП «Геотек»», г. Пенза, g-boldyrev@geotek.ru

ЖИВАЕВ А.А.

Руководитель исследовательского отдела ООО «НПП «Геотек»», г. Пенза

BOLDYREV G.G.

Professor of the «Beds and Foundations» department of the Civil Engineering Institute of the Penza State University of Architecture and Construction, technical director of the «NPP Geotek» LLC, Penza, g-boldyrev@geotek.ru

ZHIVAEV A.A.

Head of the Research Division of the «NPP Geotek» LLC, Penza

ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ GEOTECHNICAL MONITORING

Ключевые слова: геотехнический мониторинг; система мониторинга; единая система мониторинга; автоматизированная система мониторинга; информационно-измерительная система; фундамент; основание; надземные строительные конструкции; диагностика состояния.

Аннотация: в данной обзорной статье кратко рассматриваются смысл, значение, функции и структура систем мониторинга строительных объектов, прежде всего геотехнического мониторинга и автоматизированных систем мониторинга. Разбирается практический пример работы такой системы. Подчеркивается, что в настоящее время в России имеются все нормативные и законодательные требования к внедрению систем мониторинга при проектировании новых и оценке состояния существующих объектов, но отсутствуют нормативные требования к информационно-измерительным системам для автоматизированных систем мониторинга.

Введение

В МГСН 2.10-04 [7, 9] под геотехническим мониторингом понимается система наблюдений и контроля состояния и изменений грунтовых, природных и техногенных условий в процессе строительства и эксплуатации объекта. В соответствии с п. 4.6 МГСН 2.07-01 [6] геотехнический мониторинг предусматривается для оценки надежности системы «основание — сооружение»,

своевременного выявления дефектов, предотвращения аварийных ситуаций и оценки правильности прогнозов, принятых методов расчета и проектных решений. Отмеченные нормативные документы предусматривают периодическое обследование грунтов и фундаментов путем визуальных и инструментальных измерений. Работы выполняются по графику через определенные интервалы времени (как пра-

Key words: geotechnical monitoring; monitoring system; integrated monitoring system; automatized monitoring system; information-measuring system; foundation; base; aboveground building structures; diagnostics of the state.

Abstract: this review article briefly discusses the meaning, significance, functions and structure of monitoring systems of construction objects, first of all geotechnical monitoring and automatized monitoring systems. A practical example of work of such a system is considered. The authors emphasize that today there are all the normative and legislative requirements for implementation of monitoring systems for design of new objects and assessment of existing ones but there are no normative requirements for information-measuring systems for automatized monitoring systems in Russia.

вило, не чаще одного раза в год или при возникновении аварийной ситуации).

В то же время при оценке надежности надземных конструкций зданий и сооружений мониторинг — это система инструментальных наблюдений и контроля, производимых непрерывно в периоды строительства, эксплуатации и снятия с эксплуатации по определенной программе для оценки технического состояния строительных конструк-



ций и сооружений в целом, анализа происходящих в них процессов и своевременного выявления изменений функциональной способности от действия статических, сейсмических и динамических нагрузок. Как видим, сюда не входят элементы геотехнического мониторинга состояния оснований зданий и сооружений.

Поэтому следует говорить о единой системе мониторинга как конструкций, так и оснований, без которой невозможно оценить надежность системы «основание — сооружение» в целом. В этом случае геотехнический мониторинг является одной из составных частей системы мониторинга конструкций, которая предусматривает оценку надежности не только оснований, но и надземных конструкций зданий и сооружений.

Несмотря на то что геотехнический мониторинг входит в общий мониторинг конструкций, на практике они часто применяются раздельно. При этом как геотехнический мониторинг, так и мониторинг надземных конструкций должны проводиться непрерывно с использованием автоматизированных систем.

В настоящее время основные требования к автоматизированным системам мониторинга конструкций регламентированы в рамках национального стандарта Российской Федерации — ГОСТ Р 22.1.12-2005 [4] — и распространяются на различные категории потенциально опасных объектов, зданий и сооружений, подлежащих оснащению структурированными системами мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений (СМИС). Помимо ГОСТ Р 22.1.12-2005 [4] необходимость проведения мониторинга с 2009 года прописана в Федеральном законе № 384-ФЗ [11].

Основное назначение СМИС заключается в выявлении зарождающихся дефектов и повреждений в материалах надземных конструкций и фундаментов. Нормативного документа для такого геотехнического мониторинга в России пока не имеется. За рубежом на объектах атомной промышленности он выполняется в соответствии с требованиями Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) [2]. При оценке сейсмической активности основные требования к сейсмическим системам мониторинга можно найти в руководстве [10].

Состояние вопроса

Геотехнический мониторинг находит широкое применение в зарубежной практике для обеспечения надежной и

безопасной эксплуатации зданий и сооружений в различных инженерно-геологических условиях. Если ранее мониторинг был основан на геодезических и локальных инструментальных измерениях и выполнялся, как правило, после проявления неравномерных осадок, крена зданий или обрушения природных склонов и др., то сегодня он представляет собой систему непрерывных измерений и расчета ряда контролируемых параметров. Можно говорить о том, что если ранее мониторинг носил периодический характер, то сейчас он используется непрерывно начиная с момента возведения объекта и в течение всего срока эксплуатации. Поэтому он позволяет в любой момент времени получить информацию о состоянии оснований и строительных конструкций.

Системы мониторинга с использованием проводной передачи сигналов с датчиков применяются давно, примерно с середины 60-х годов прошлого столетия. Примеры применения проводной связи приведены в работе [3]. В ней рассматривается опыт использования систем мониторинга большой спортивной арены в Лужниках, крытого конькобежного центра на 10 тыс. зрителей в Крылатском и ряда других объектов.

Первые системы мониторинга были созданы для наблюдений за конструкциями зданий при землетрясениях. Это способствовало более глубокому пониманию природы землетрясений, их влияния на конструкции, что в итоге привело к разработке более надежных проектов сооружений в зонах с высокой сейсмической активностью. В большинстве случаев, известных в мировой практике, системы мониторинга наиболее широко используются для контроля поведения длинных мостов. Калифорнийский департамент транспорта (США) использует результаты измерений с помощью таких систем не только для тестирования проектных решений, но и при устранении повреждений сразу же после больших землетрясений [17]. В Европе и в России применяют оптоволоконные датчики деформации для управления нагрузками и оценки технического состояния строительных конструкций, включая основания и фундаменты [8, 12–16, 21]. В Азии многие большие мосты подвергались инструментальным наблюдениям в течение их строительства [18, 19, 22].

Наблюдаемые в последнее время в РФ разрушения зданий и сооружений вынуждают использовать новые технологии с целью исключения подобных ситуаций. Наиболее часто для этой цели применяются проводные и более редко беспроводные системы мониторинга [1, 13–15].

Подобные системы используют стандартные датчики и системы сбора и передачи информации, которые, как правило, не только сложны в установке на конструкциях, но и дороги. Например, один датчик деформации может стоить от 600 и более долларов США, а акселерометр — до 1000 и более. Система сбора и передачи информации, включающая электронные устройства усиления сигналов с датчиков и преобразования их в цифровой код на восемь измерительных каналов стоит от 3000 долларов США и выше. Это означает, что системы мониторинга, включающие большое количество датчиков, являются дорогостоящими и поэтому редко устанавливаются на конструкциях зданий и сооружений, а тем более в основаниях фундаментов. Обычно цена системы мониторинга составляет до 3–6% от стоимости здания или сооружения. Например, при монтаже 350 датчиков на вантовом мосту Tsing Ma в Гонконге [18] затраты составили более 8 млн долларов.

Основные функции систем мониторинга

Если известны значения контролируемых параметров, то в наиболее простом варианте система мониторинга обеспечивает выполнение следующих функций:

- 1) периодический контроль напряженно-деформированного состояния элементов строительных конструкций и оснований объектов, выдача информации о приближении измеренных значений контролируемых параметров к проектным значениям (в качестве контролируемых параметров принимаются нормативные значения осадки, крена, прогиба, предел прочности материала, амплитуда колебаний и др.);
- 2) осуществление системой при возникновении ситуации, указанной в пункте 1: постоянного контроля напряженно-деформированного состояния строительных конструкций и оснований; формирования сигналов опасности; выдачи информации о месте превышения проектных значений контролируемых параметров, в том числе в отношении прочности и деформации;
- 3) автоматическая регистрация контролируемых параметров оперативной

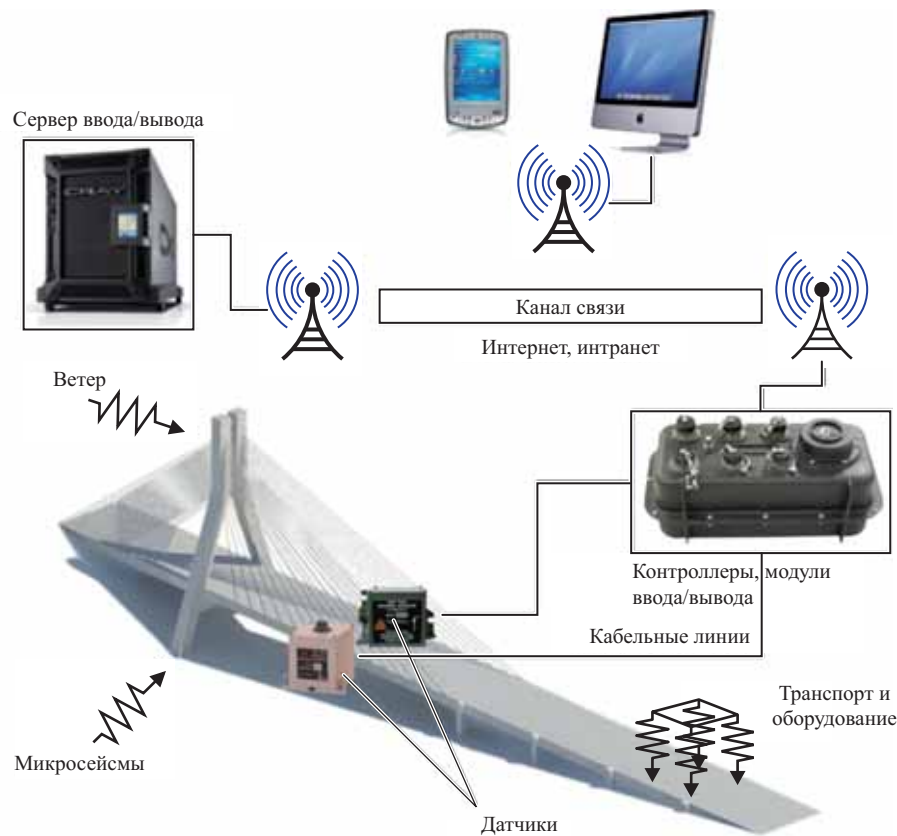


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной системы мониторинга [21]

памяти системы; выдача отчетов о событиях в соответствии с запросом, а при наступлении событий, указанных в пункте 2, — автоматически;

4) оповещение о эвакуации людей при недопустимых значениях контролируемых параметров.

Проектные значения контролируемых параметров определяются с использованием линейных или нелинейных методов расчета с учетом изменений свойств материалов во времени при действии статических, динамических и/или сейсмических нагрузок. Для учета этого фактора и определения остаточного ресурса конструкций в более сложных системах мониторинга предусмотрена процедура автоматического расчета напряженно-деформированного состояния строительных конструкций и оснований для определения текущих значений контролируемых параметров. Эти системы могут определять динамические характеристики — собственные частоты, формы деформации и декремент затухания. В этом случае начальные значения контролируемых параметров принимаются за эталонные, характеризующие «здоровое» состояние, а все последующие сравниваются с эталонными. Любое отклонение от начального состояния контролиру-

ется и оценивается с заданным интервалом времени.

Технические средства систем мониторинга

Современные системы мониторинга являются информационно-измерительными, состоящими из набора датчиков, называемых сенсорными узлами, регистраторов и программных средств. Пример подобной системы мониторинга показан на рис. 1. Информация с датчиков по проводной или беспроводной связи передается на центральный сервер, где обрабатывается, и в зависимости от ситуации на пульте оператора выдаются соответствующие сообщения о текущем состоянии объекта мониторинга.

Традиционно все системы мониторинга, в том числе и геотехнического, основаны на методах, при использовании которых датчики различного назначения устанавливаются непосредственно на элементах надземных строительных конструкций, внутри материала, на фундаменте, под его подошвой или в массиве грунта. В этом случае применяются:

- тензометрические или струнные датчики деформации для определения напряженно-деформированного состояния стальных (шпунт), бетон-

ных и железобетонных конструкций;

- датчики перемещений для определения прогиба или осадки фундаментов;
- датчики давления (месдозы) для измерения контактных напряжений и напряжений внутри основания;
- инклинометры для измерения наклона конструкций и крена фундаментов;
- акселерометры для измерения ускорения колебаний и определения динамических характеристик фундаментов, ограждений котлованов, плотин и др.;
- датчики температуры, влажности, коррозии;
- пьезометры для контроля положения уровня грунтовых вод и величины порового давления.

Данный метод геотехнического мониторинга можно классифицировать как «контактный», так как он подразумевает установку датчиков на поверхности конструкций, на арматуре и в бетоне фундаментов, на контакте конструкции с грунтом и в массиве грунтов основания.

В то же время в последние годы стал применяться так называемый бесконтактный или, как его чаще называют, удаленный мониторинг, который ис-

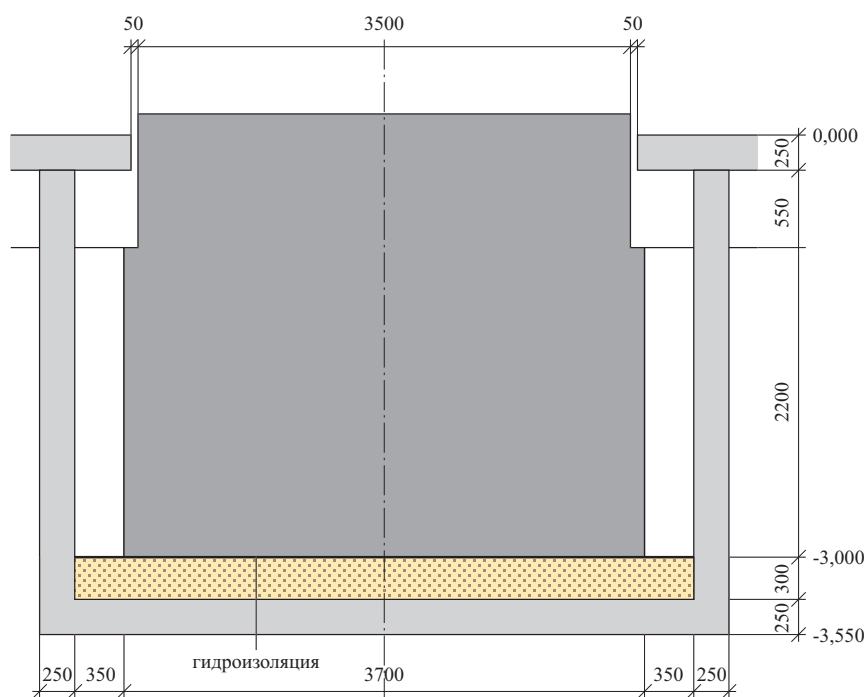


Рис. 2. Поперечный разрез фундамента

пользует технологии лазерного и электромагнитного сканирования земной поверхности, роботизированные геодезические станции, цифровую обработку образов и др.

В настоящей работе рассматривается применение контактных методов мониторинга.

Основным компонентом системы мониторинга являются сенсорные узлы и датчики — тензометры, акселерометры, инклинометры, перемещения, термометры. Датчики размещаются в наиболее нагруженных элементах конструкций. Места размещения определяются расчетом напряженно-деформированного состояния конструкций зданий совместно с основанием с использованием различных программных комплексов — ANSYS, ABAQUS, PLAXIS, FLAC, GEO-SLOPE и др.

Так как датчиков может быть много, то в совокупности они образуют сенсорную сеть, в узлах которой они и располагаются. Сенсорные узлы выполняют различные задачи: собирают аналоговые сигналы с различных датчиков и превращают их в цифровой код; хранят данные с датчиков во внутренней памяти; анализируют информацию в виде простых алгоритмов; посылают и получают данные от различных узлов, передают их на центральное устройство (сервер) и могут работать определенное время без внешнего источника питания. Поэтому сенсорные узлы имеют внутреннюю память, низкоча-

стотный передатчик, аналого-цифровой преобразователь, источник питания, один или несколько типов датчиков.

Система мониторинга должна обеспечивать передачу данных с контролируемых мест без их визуального осмотра. Результаты измерений могут передаваться от датчиков пользователю различными путями, например на нелегализуемой радиочастоте 2,5 ГГц.

При использовании беспроводной системы мониторинга несколько датчиков объединяются в сенсорный узел, который имеет свой автономный источник питания (2,5–6,0 В) и может самостоятельно передавать сигналы только на небольшие расстояния — как правило, не более чем на 100 м. Поэтому на объекте устанавливается центральное устройство, которое собирает и хранит в базе данных информацию с различных сенсорных узлов для анализа. Эти данные используются для оценки текущего состояния объекта, и в случае наступления критической ситуации выдается сообщение в виде сигнала тревоги. Центральное устройство должно выполнять также калибровку датчиков и обеспечивать перепрограммирование их узлов, сохраняя «гибкость» системы в целом. Центральное устройство должно иметь, как правило, компьютер с постоянным источником питания и соответствующими программами.

При использовании проводной системы мониторинга датчики подклю-

чаются к модулям, которые преобразуют аналоговые сигналы с них в цифровой вид и передают далее по проводам на центральный сервер. Применяемая всеерная архитектура («втулка — спица») проводной системы мониторинга конструкций включает удаленные датчики, связанные проводами с центральной системой сбора данных и компьютером.

Достоинством беспроводных систем мониторинга является их быстрая установка на конструкциях зданий или сооружений, так как не требуется монтаж проводов. Основным недостатком подобных систем — необходимость регулярной замены источников питания — батарей или аккумуляторов. Как правило, продолжительность работы источника питания не превышает нескольких дней. В последнее время начали применяться специальные алгоритмы для снижения электропотребления, но эта проблема пока еще не решена на удовлетворительном уровне. Поэтому заменять батареи питания сенсорного узла, находящегося, например, в центре пролета металлической фермы или внутри массива грунта (например, за обделкой тоннеля), достаточно проблематично. Вторым недостатком беспроводных систем является возможность потери части информации при ее передаче на радиочастоте из-за влияния помех в окружающей среде. Дальность передачи информации известных коммерческих систем не превышает 30–70 м, что также ограничивает применение данных систем.

Практический пример использования системы мониторинга

В 2011–2013 гг. специалистами ООО «НПП «Геотек»» были проведены измерения ускорения колебаний фундаментов под измерительное оборудование одного из промышленных предприятий в России.

Исследуемые фундаменты (рис. 2) конструктивно находятся в железобетонном коробе, имеющем толщину дна и стен 250 мм. По дну короба устроена песчаная уплотненная подушка толщиной 300 мм, на которую установлено тело фундамента. Между стенками короба и фундаментом имеется зазор толщиной 350 мм. Вокруг фундамента имеется фальшпол, выполненный из железобетона толщиной 250 мм. Зазор между фальшполом и фундаментным блоком составляет 50 мм. В верхней части фундамент круглый, диаметром 2 м, с примыкающим к не-

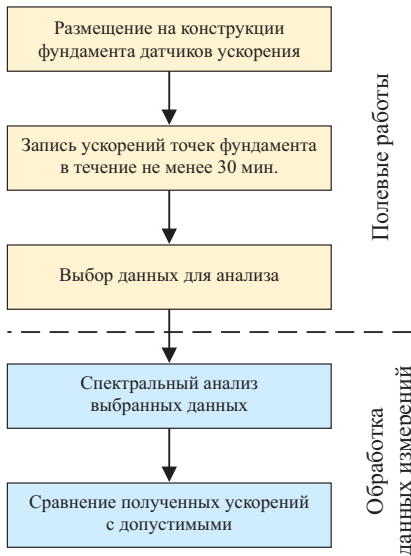


Рис. 3. Блок-схема мониторинга фундаментов

му приливом в виде прямоугольника, имеющим размеры в плане 1500×900 мм. Верх фундамента расположен выше уровня пола на 150 мм.

На территории предприятия работает различное технологическое оборудование — вентиляторы, насосы, компрессоры и др. С двух сторон предприятия проходят городские магистрали с трамвайными путями, по которым осуществляется интенсивное движение трамваев и автотранспорта.

При проведении инструментальных измерений применялась методика, представленная на рис. 3 в виде блок-схемы.

На каждом фундаменте закреплялось четыре однокоординатных акселерометра. Датчики модели RefTek 131-01/1 крепились на монтажную пластину, которая была прикреплена к фундаменту при помощи анкерного болта. Предварительно пластина выставлялась в горизонтальное положение при помощи подстроечных винтов и электронного уровня. Трехкоординатный акселерометр RefTek 131-01/3 крепился непосредственно к фундаменту при помощи аналогичного анкерного болта.

Регистрация сигналов с датчиков осуществлялась шестиканальным сейсмоприемником RefTek 130-01. Частота записи сигналов составляла 500 Гц. Регистрация колебаний каждого фундамента велась не менее 30 минут. Результаты измерений передавались в персональный компьютер интерактивно.

Вибрационный фон площадки является результирующим от суммарного воздействия источников вибрации,

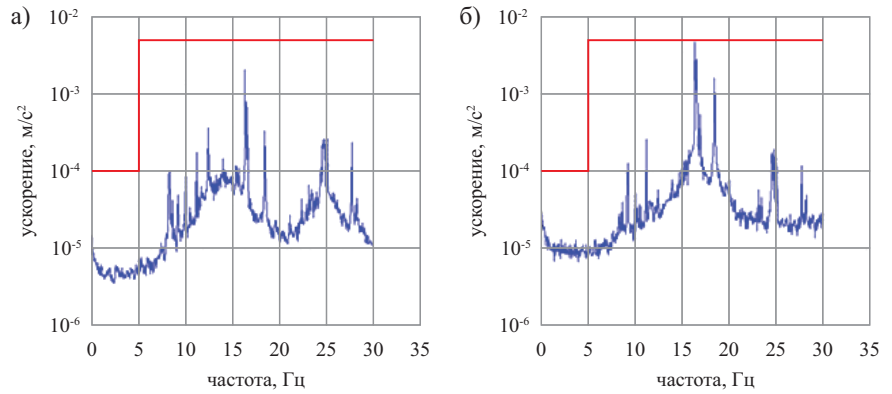


Рис. 4. Спектр горизонтальных ускорений фундамента в направлении оси X (а) и оси Y (б)

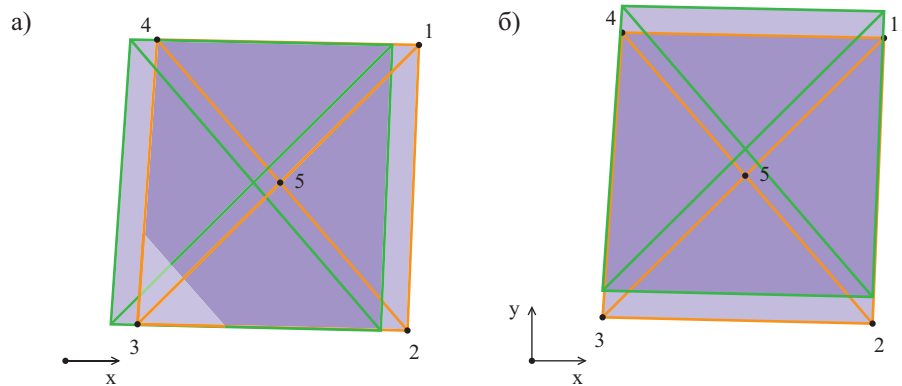


Рис. 5. Формы колебаний фундамента: а — вдоль оси X (10,87 Гц); б — вдоль оси Y (16,44 Гц)

имеющих постоянный, переменный или импульсный характер, что обуславливает наличие на фундаментах колебаний переменного и случайного характера. Колебания фиксировались одновременно в четырех точках по трем координатным осям. При записи регистрировались ускорения точек фундамента. Спектры были получены при помощи быстрого преобразования Фурье. Величины скоростей и перемещений были получены путем интегрирования измеренных ускорений.

На рисунках 3, 4 приведены результаты обработки данных измерений. Для одного из фундаментов максимальная амплитуда ускорений в направлении оси X значительно превышает нормируемую амплитуду ускорений в направлении оси Y (см. рис. 3, б). В ходе исследований было сделано предположение, что данный эффект вызван явлением резонанса на частоте, близкой к 16,67 Гц, что соответствует двигателю с частотой 1000 об/мин. Момент инерции фундамента в направлении оси Y выше, чем в направлении оси X. Из-за указанного различия резонанс проявляется только в одном из направлений.

С помощью программы ARTeMIS Extractor [20] был выполнен экспериментальный модальный анализ, в результате которого было выявлено, что частота собственных колебаний фундамента в направлении оси Y составляет 16,44 Гц, а в направлении оси X — 10,87 Гц (см. рис. 4). Полученные результаты подтвердили причины всплеска амплитуды на частоте, близкой к 16,67 Гц.

В связи с тем что рассматриваемое предприятие находится в черте города, невозможно избавиться от некоторого уровня вибрации от воздействия окружающей среды. Постоянную компоненту вибрации создают стационарные источники — двигатели, насосы и прочее оборудование предприятия и близлежащих объектов. Переменную часть вибрации создают нестационарные источники — городской транспорт и транспорт предприятия.

На протяжении всего времени измерений в отклике одной из точек измерений присутствуют всплески амплитуды на частотах 16,67 Гц и 25 Гц. Однако в течение нескольких десятков секунд в то время, когда по коридору здания катили транспортную тележку, в



спектре фиксировались всплески амплитуды колебаний на тех частотах, на которых их ранее не наблюдалось. Причем амплитуда зафиксированного всплеска оказалась соизмеримой с таковой для колебаний при воздействии стационарных источников.

Таким образом, если в течение основного периода времени параметры колебаний фундамента находятся в допустимых нормах, то в некоторые промежуточные моменты времени на него может быть оказано воздействие, от которого указанные параметры могут превысить допустимые значения. Это может привести к тому, что настраиваемый на фундаменте прибор может быть ошибочно забракован. Для исключения та-

ких ситуаций может быть применена система стационарного мониторинга параметров колебаний фундаментов. При проведении настройки оборудования в случае превышения нормируемых параметров система может передавать оператору тревожное сообщение.

Выводы

1. Применение систем мониторинга позволяет выполнять непрерывную диагностику состояния различных объектов во времени.

2. Системы мониторинга обладают способностью оценивать изменения в напряженно-деформированном состоянии как надземных строительных кон-

струкций, так и фундаментов совместно с основаниями.

3. Разработанные проводные и беспроводные информационно-измерительные системы могут эффективно применяться при создании систем мониторинга для работы в реальном режиме времени.

4. В настоящее время имеются все нормативные и законодательные требования к внедрению систем мониторинга как при проектировании новых, так и при оценке технического состояния существующих объектов. Однако в России нет нормативных требований к информационно-измерительным системам для автоматизированных систем мониторинга. ❖

Список литературы

1. Баскаков С. Беспроводная система мониторинга состояния строительных конструкций // Беспроводные технологии. 2010. № 3. С. 52–54.
2. Геотехнические аспекты оценки площадок и оснований АЭС: руководство по безопасности № NS-G-3.6. Вена: МАГАТЭ, 2005. 67 с.
3. Горинченко В.М., Егоров М.И. Мониторинг эксплуатационной пригодности особо ответственных, сложных и уникальных сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2004. № 10. С. 39–41.
4. ГОСТ Р 22.1.12-2005. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования. М.: Росстандарт, 2005.
5. Живаев А.С. Мониторинг строительных конструкций: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Пенза: ПГУАС, 2011.
6. МГСН 2.07-01. Основания, фундаменты и подземные сооружения. М.: Правительство Москвы, 2003.
7. МГСН 2.10-04. Предпроектные комплексные обследования и мониторинг зданий и сооружений для восстановления, реконструкции и капитального ремонта. М.: Правительство Москвы, 2004.
8. Неугодинов А.П., Рубцов И.В., Егоров Ф.А., Крыжановский А.Л., Коньков Е.В., Гапонов С.С., Поспелов В.И. Трехуровневая система мониторинга надежности фундаментов строительных сооружений // Новый уральский строитель. 2004. № 11. С. 47–49.
9. Пособие к МГСН 2.07-01. Основания, фундаменты и подземные сооружения. Обследование и мониторинг при строительстве и реконструкции зданий и подземных сооружений. М.: Правительство Москвы, Москомархитектура, 2004. 117 с.
10. Руководство по методике комплексного инженерно-сейсмометрического и сейсмологического мониторинга конструкций зданий и сооружений, включая площадки их размещения. М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2011. 20 с.
11. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: Федеральный закон Российской Федерации от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ. М.: ГД ФС РФ, 2009.
12. Ahlborn T.M., Shuchman P.E., Sutter L.L., Brooks C.N., Harris D.K., Burns J.W., Endsley K.A., Evans D.C., Vaghefi K., Oats R.C. The state-of-the-practice of modern structural health monitoring for bridges: a comprehensive review. Houghton, Michigan, USA: Michigan Tech Transportation Institute (for the USDOT/RITA), 2010. 70 p.
13. Boldyrev G., Valeev D., Idrisov I., Krasnov G. A system for static monitoring of sports center structures / Proceedings of the 7th International Workshop on Structural Health Monitoring. Stanford, CA, USA: Stanford University Press, 2009. V. 1. P. 374–382.
14. Boldyrev G.G., Zhivaev A.A. System for static and dynamic monitoring of Ice Sport Arena / Proceedings of the 8th International Workshop on Structural Health Monitoring. Stanford, CA, USA: Stanford University Press, 2011. P. 378–385.
15. Boldyrev G.G., Zhivaev A.A. Vibration level assessment of nuclear power plant Powerhouse Hall // Special Topics in Structural Dynamics. V. 6. Proceedings of the 31st Conference on Structural Dynamics IMAC. Society for Experimental Mechanics, 2013. Series 43.
16. Brownjohn J.M.W. Structural health monitoring of civil infrastructure // Philosophical Transactions of the Royal Society. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2007. V. 365. № 1851. P. 589–622.
17. Doebling S.W., Farrar C.R., Prime M.B. A summary review of vibration-based damage identification methods // The Shock and Vibration Digest. 1998. V. 30. № 2. P. 91–105.
18. Li O., Xu Y.-L., Zheng Y., Guo A.-X., Wong K.-Y., Xia Y. SHM-based F-AHP bridge rating system with application to Tsing Ma Bridge // Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China. 2011. V. 5. № 4. P. 465–478.
19. Ren W.-X., Lin Y.-O., Peng X.-L. Field load tests and numerical analysis of Qingzhou cable-stayed bridge // Journal of Bridge Engineering. 2007. V. 12. № 2. P. 261–270.
20. Software for operational modal analysis / ARTEMIS website. www.svibs.com.
21. Van der Auweraer H., Peeters B. International research projects on structural health monitoring: an overview // Sage Publications. 2003. V. 2. № 4. P. 341–358.
22. Yun C.B. Recent R&D activities on structural health monitoring for civil infra-structures in Korea // KSCE Journal of Civil Engineering. 2003. V. 7. P. 637–651.